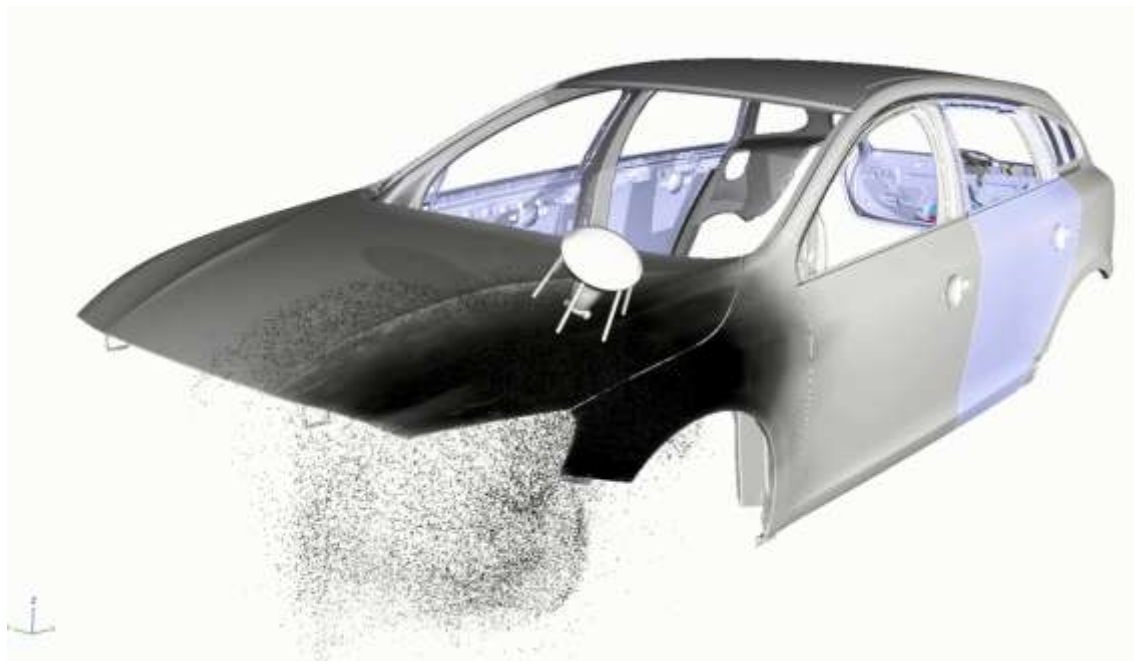


FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

## Virtual PaintShop – Pulver och Externt Laddad Våtfärg



Författare: Fredrik Edelvik, Johan S. Carlson

Datum: 2015-06-22

Delprogram Hållbar produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Syfte .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Genomförande .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Resultat och leveranser .....</b>	<b>8</b>
5.1. Leverans mot FFI-mål.....	11
<b>6. Spridning och publicering .....</b>	<b>12</b>
6.1. Kunskaps- och resultatspridning .....	12
6.2. Publikationer .....	13
<b>7. Slutsatser och framtida forskning.....</b>	<b>14</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner .....</b>	<b>15</b>

### Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi)

## 1. Sammanfattning

Ytbehandlingen är den process i fordonsindustrin som förbrukar mest energi, vatten och kemikalier, samt producerar mest avfall och föroreningar. Ungefär 40 % av energin i större används i målerianläggningen med en genomsnittlig förbrukning om 700-900 kWh per bilkaross. Inom målerianläggningen är den dominerande energikostnaden ventilation och uppvärmning av luften i båset (50 %) följt av ugnarna (25 %). Virtuella verktyg används frekvent för att stödja en effektiv produkt och produktionsrealisering i andra delar av fabriken, men detta är inte fallet i målerianläggningen. I målerianläggningen är produktionsberedningen, när robotbanor och processparametrar finjusteras, en långsam

och kostsam försöksprocess där ett stort antal prototyper målas, tvättas och ommålas, etc. Det finns därför ett stort behov av att förbättra produktionsberedningsprocessen, vilket är en absolut nödvändighet för att möta framtida krav på snabb anpassning och skräddarsydda lösningar för nya materialkombinationer och produkter. Möjligheten att genomföra systematiska simuleringar blir då väsentlig och bidrar till en hållbar produktion genom att reducera antalet prototyper som behöver målas och genom att möjliggöra en optimerad process med hänsyn till kvalitet, kostnad och miljöpåverkan.

De unika metoderna och vertygen för simulering av sprutmålning, vilka utvecklats i tidigare FFI och MERA projekt, har i detta projekt utökats till simulering av pulver och externt laddad våtfärg och hjälper företag att utveckla och optimera sina ytbehandlingsprocesser

- att bli mer miljövänliga,
- att bli mer energieffektiva,
- att bli mer kostnadseffektiva,
- att ge en bättre produktkvalitet.

Huvudmålen för projektet var

- Metoder och algoritmer för simulering av coronaurladdning vid färgapplikatorer;
- Metoder och algoritmer för simulering av uppladdning av färgpartiklar;
- Metoder och algoritmer för hastighetsoptimering längs en given robotbana för att uppnå jämnare färgskikt;
- Tekniker för mätning av elektrostatiske egenskaper för externt laddade färgapplikatorer;
- Vidareutveckling av test- och demoanläggningen Paint Center, en oberoende anläggning som möjliggör applicering, mätning och validering av lackeringsprocesser off-line;
- Simuleringsmjukvara för snabb och noggrann simulering av externt laddad pulver och våtfärg.

Projektresultaten visar att det är möjligt att noggrant simulera sprutmålning av en lastbilshytt eller en bil med endast några timmars simuleringstid på en standarddator. Detta är en extrem förbättring jämfört med tidigare tillvägagångssätt som krävt veckolånga simuleringar. Unika algoritmer för kopplade simuleringar av luftflöde, elektromagnetiska fält och laddade färgpartiklar har möjliggjort detta. Metoderna och vertygen har genomgått en omfattande validering på relevanta industrifall med mycket god överensstämmelse mellan mätningar och simuleringsresultat. De snabba simuleringarna gör det möjligt att använda detaljerade simuleringar i produktionsberedningen och off-line programmeringen av målningsrobotorna. Dessutom

gör det sprutmålningsmjukvaran enklare att använda och underlättar spridning till andra branscher och även mindre företag.

En stor utmaning i projektet har varit simulering av coronaurldningen nära applikatoren och uppladdningen av färgpartiklarna när de passerar genom Corona-området. Den komplexa fysiken ställer mycket höga krav på de numeriska metoderna. De nya metoderna är mycket robustare än tidigare ad-hoc metoder och är även relevanta för andra tillämpningar såsom elektrostatisk luftrening.

Vidare så har nya metoder och tekniker utvecklats för att kunna anpassa robotens hastighet längs banan för att uppnå minimal variation i färgtjocklek på det målade objektet. Resultaten visar att variationen minskar med en faktor 2-3, vilket i ett av testfallen motsvarande nästan 20% minskning av färgmängden med bibehållen minimitjocklek. I framtida projekt kommer resultaten generaliseras till att även andra processparametrar kan ändras längs banan samt att även banan kan ändras.

Projektresultaten har kommersialiserats i programvaran IPS Virtual Paint, som används av bland andra Volvo Personvagnar, AB Volvo, Scania, CEVT, Daimler och GM, och har även lett till ett nystartat företag, IPS IBOFlow AB. Volvo Personvagnar använder mjukvaran i produktion och till exempel så användes den framgångsrikt för att programmera målerirobotarna till den nya XC90 modellen.

Den långsiktiga sponsringen från Vinnova har gjort det möjligt att bygga upp ett världsledande forskningsteam för målnings- och ytbehandlingsprocesser med expertis inom modellering och simulering, avancerad mätning och validering samt industriell processkunskap.

## **2. Bakgrund**

Ytbehandlingen är den process i fordonsindustrin som förbrukar mest energi, vatten och kemikalier, samt producerar mest avfall och föroreningar. Ungefär 40 % av energin används i målerianläggningen med en genomsnittlig förbrukning om 700-900 kWh per bilkaross. Inom målerianläggningen är den dominerande energikostnaden ventilation och uppvärmning av luften i båset (50 %) följt av ugnarna (25 %). Vidare är dagens produktionsberedning när robotbanor och processparametrar finjusteras en långsam och kostsam försöksprocess där ett stort antal prototyper målas, tvättas och ommålas, etc. Resultatet beror helt på hur väl fabrikspersonalen har lyckats med uppgiften att ställa in rätt processparametrar. Inställningen kompliceras av att varje kombination av produktspecifikationer, materialspecifikationer, design av produkt och utrustning är unik och en liten avvikelse kan göra stor skillnad på slutresultatet. Att upptäcka fel i slutet av produktionslinan, eller ännu värre i kundledet, kan bli extremt kostsamt.

Det finns därför ett stort behov av att förbättra produktberedningen, vilket är en absolut nödvändighet för att möta framtida krav på snabb anpassning och skräddarsydda lösningar för nya materialkombinationer och produkter. Möjligheten att genomföra systematiska simuleringar blir då väsentlig och bidrar till en hållbar produktion genom att reducera antalet prototyper som behöver målas och genom att möjliggöra en optimerad process med hänsyn till kvalitet, kostnad och miljöpåverkan.

Sprutmålnings- och ytbehandlingsprocesser utgör emellertid stora utmaningar för matematisk modellering och simulering och karakteriseras av flerfas och ytflöden, multifysik, flerskalefenomen och stora, rörliga geometrier. I tidigare projekt har världsledande mjukvarulösningar utvecklats för simulering av sprutmålning med internt laddade elektrostatiske roterande klockor.

### 3. Syfte

Syftet med projektet är att vidareutveckla de unika metoderna och verktygen för simulering av sprutmålning, som utvecklats inom ramen för tidigare FFI och MERA projekt, till simulering av pulver och externt laddad våtfärg. Detta stöder en bredare användning av verktygen inom fordonsindustrin och även inom andra branscher. Projektresultaten hjälper företag att utveckla och optimera sina ytbehandlingsprocesser

- att bli mer miljövänliga,
- att bli mer energieffektiva,
- att bli mer kostnadseffektiva,
- att ge en bättre produktkvalitet.

Huvudmålen för projektet var

- Metoder och algoritmer för simulering av coronaurpladdning vid färgapplikatorer;
- Metoder och algoritmer för simulering av uppladdning av färgpartiklar;
- Metoder och algoritmer för hastighetsoptimering längs en given robotbana för att uppnå jämnare färgskikt;
- Vidareutveckling av test- och demoanläggningen Paint Center, en oberoende anläggning som möjliggör applicering, mätning och validering av lackeringsprocesser off-line;
- Tekniker för mätning av elektrostatiske egenskaper för externt laddade färgapplikatorer;
- Simuleringsmjukvara för snabb och noggrann simulering av externt laddad pulver och våtfärg.

## **4. Genomförande**

Projektet var fördelat på sju arbetspaket. De första tre fokuserade på modelleringen, simuleringen och optimeringen, och de övriga fyra rörde mätningarna och valideringarna, mjukvarudemonstratorn och exploateringen, den långsiktiga strategin och projektledning.

### **4.1. WP1: Modellering och simulering av coronaurladdning vid färgapplikatorer**

I detta arbetspaket var fokus på att beräkna det elektrostatiske fältet och jonladdningsdensiteten för externt laddade färgapplikatorer. En stor negativ potential sätts på en elektrod, vilken antingen är fastsatt direkt på en applikator eller i dess närhet. Detta orsakar en coronaurladdning som frigör negativa joner vilka rör sig mot objektet som ska målas, bombarderar färgpartiklarna och laddar upp dem. Randvillkoren på den spetsiga nålens elektroder är numeriskt väldigt komplext att hantera och ett väldigt fint beräkningsnät krävs. För att förbättra exaktheten och robustheten, har en tre-arts modell utvecklats och implementerats. Randvillkoren blir därmed enkla, men även i detta fallet krävs ett väldigt fint beräkningsnät. Därför utvecklades en kombination av lösaren för tre-arts modellen som användes i joniseringsregionen nära elektroderna med en snabbare en-arts lösare utanför denna region. Detta hybridkoncept validerades framgångsrikt genom mätningar. Den unika forskningen inom detta arbetspaket har publicerats i Journal of Electrostatics.

### **4.2. WP2: Utformning och simulering av uppladdning av färgpartiklar**

Coronalösaren ger en exakt beskrivning av de elektrostatiske egenskaperna på externt laddade färgapplikatorer: pulverstrutor och externt laddade våtfärgsapplikatorer. Detta har använts för att utforma uppladdningen av färgpartiklarna. Hastigheten hos de laddade jonerna, den främsta laddningsbäraren är O<sub>2</sub>, är åtminstone 100 gånger snabbare än färgpartiklarna. Jonerna överför laddning till färgen vid sammanstötning och uppladdningen, dvs hur mycket laddning som överförs från en jon till en färgpartikel beror på den effektiva ytarean hos partiklarna. För en oladdad partikel är den effektiva ytarean lika stor som hela ytan. Medan partikeln ackumulerar laddning kan joner endast träffa en krympande region runt ekvatorn hos partikeln, vilket minskar den effektiva ytarean. Detta beskrivs i Pauthenier och Moreu-Hanot formeln, vilken vi har implementerat i partikel spårningsalgoritmer samt lagt till både uppladdningen av färgpartiklarna och de elektrostatiske krafter som verkar på dem. Kopplingen mellan de fluiddynamiska och de elektrostatiske lösarna har även implementerats.

### **4.3. WP3: Generering av målningsbanor för autmotatiserad sprutmålning**

Innehållet i detta arbetspaket förändrades under projektets gång till att fokusera på hastighetsoptimering för att förbättra färgtäckningen för en given robotbana process-

parametrar. Utvecklingen av robotkod för linjärmaskiner sköts på framtiden eftersom projektpartnern som var intresserad av detta sköt upp investeringen.

En optimeringsalgoritm utvecklades. Givet en målningssimulering hastigheten längs banan optimeras så att variationen i färgtjocklek minimeras. Resultaten visar en minskning av variationerna med en faktor 2-3 för testfallen (en bilframskärm, en dörr till en lastbilshytt och en del till en gaffeltruck). Detta innebär en betydande potential att minska färgåtgången och öka kvaliteten. För gaffeltrucken kunde färgmängden minskas med 20% med bibehållen minimitjocklek. I framtiden kommer algoritmerna utökas till att inte bara tillåta hastighetsförändringar längs banan, utan även förändringar i penslarna (förändringar av processparametrar), och slutligen kommer även banan kunna ändras.

#### **4.4. WP4: Mätningar och validering**

I detta arbetspaket har den nödvändiga metodiken för mätningar av de elektrostatiske egenskaperna hos applikatorerna utvecklats och mätningar har utförts för att säkerställa en lyckad implementering av metoderna och algoritmerna inom WP1 till WP3. Detta inkluderade mätningar av elektrostatik, PIV och partikelstorlek för att karakterisera de olika applikatorerna och pistolen som använts i projektet, målning och mätning av den slutliga färgtjockleken på plattor och testobjekt. Mätningar och valideringar har utförts på Paint Center, ett test- och democenter hos Swerea IVF, vilket möjliggjort att utvärdera målningens parametrar och processer externt utan att påverka produktionen hos våra industriella partners.

#### **4.5. WP5: Ytbehandlingsplattform och exploatering**

Leveranserna från detta arbetspaket har varit demonstratorer för IPS-plattformen som integrerar metoderna och algoritmerna som utvecklats inom WP1 till WP3. Flertalet utbildnings-tillfällen avseende det utvecklade mjukvaruverktyget har arrangerats under projektets gång, med deltagare från våra projektpartners. Vidare har projektets resultat presenterats vid flertalet internationella konferenser, vid mässan Scandinavian Coating, publicerats i tidskrifter, i två konferensbidrag samt i facktidskriften Ytforum. Därtill har mjukvaruverktyget och projektresultaten presenterats vid flertalet möten med internationella fordonstillverkare som har visat stort intresse för resultaten.

#### **4.6. WP6: Långsiktig strategi för virtual paint**

I detta arbetspaket har den långsiktiga strategin för virtual paint-projektet diskuterats vid flertalet möten av en projektgrupp med deltagare från instituten och företagen. Visionen för 2020 är ”En simuleringsmjukvara som tillåter måleri-processteknikern att automatiskt generera ett fullständig målning-/tättningsprogram inkluderat robotbanor och processparametrar som garanterar en viss täckning och cykeltid”. De detaljerade mjukvarukraven, indata och utdata diskuterades och sammanställdes i en rapport.

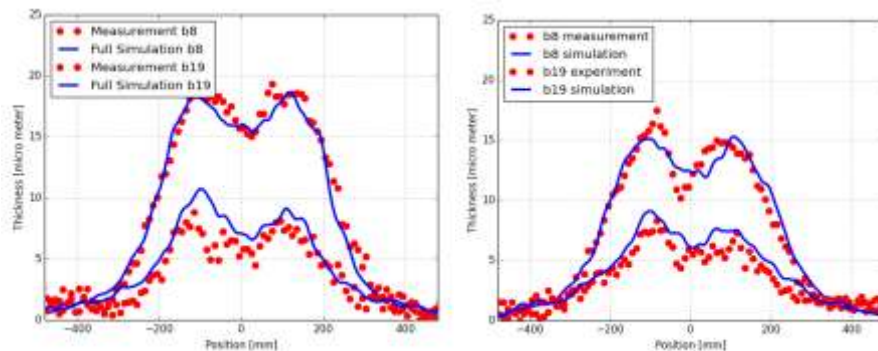
Tillgängliga finansiering som kan komplettera FFI diskuterades också. FCC utarbetar t.ex. ett förslag till ett internt Fraunhofer-projekt vars mål är att uppfylla delar av denna vision.

#### 4.7. WP7: Projektledning

En projektgrupp bestående av medlemmar från samtliga deltagande partners utsågs och var ansvariga för projektledning, finanser och rapportering till Vinnova.

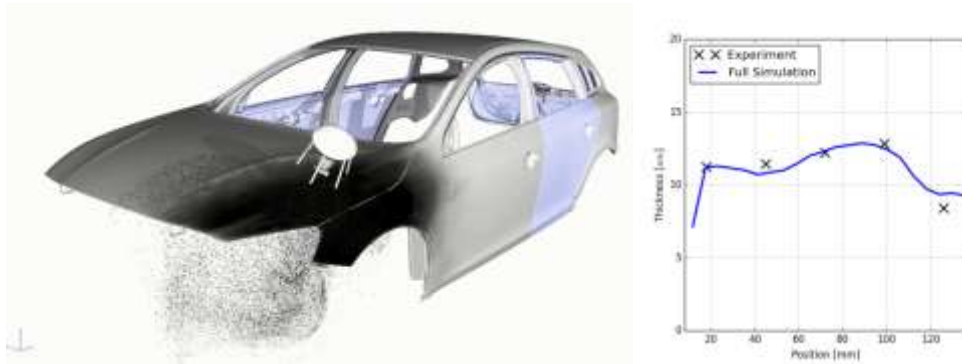
### 5. Resultat och leveranser

Projektresultaten visar att det är möjligt att noggrant simulera sprutmålning av t.ex. en lastbilshytt på endast några timmar på en standarddator. Detta är en extrem förbättring jämfört med tidigare tillvägagångssätt som kräver veckolånga simuleringar. Unika algoritmer för kopplade simuleringar av luftflöde, elektromagnetiska fält och laddade färgpartiklar har möjliggjort detta. Metoderna och verktygen har genomgått en omfattande validering på relevanta industrifall med mycket god överensstämmelse mellan mätningar och simuleringar. De snabba simuleringarna gör det möjligt att använda detaljerade simuleringar i produktberedningen och off-line programmeringen av målningsrobotorna. Utvidningarna i detta projekt underlättar en bredare användning av mjukvaran inom fordonsindustrin samt spridning till andra branscher och även mindre företag.

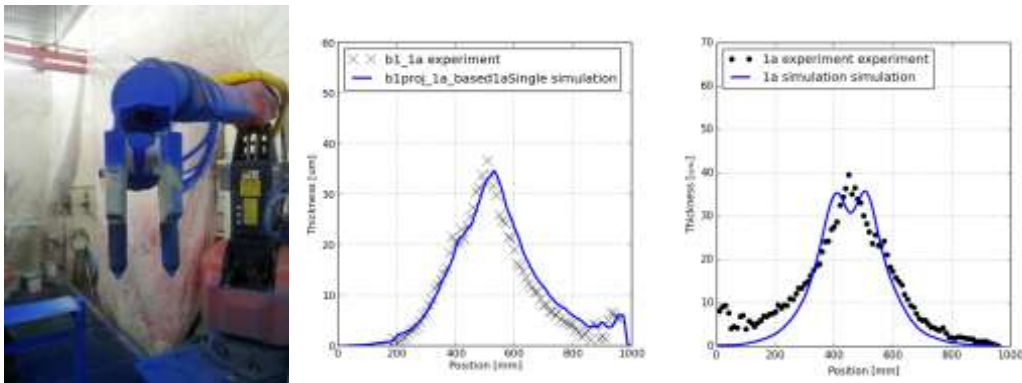


Figur 1. Jämförelse mellan mätningar och simuleringar på en platta målad med en externt laddad ABB G1 applikator. Resultaten på kanten av plattan visas till vänster och resultaten i mitten av plattan visas till höger.

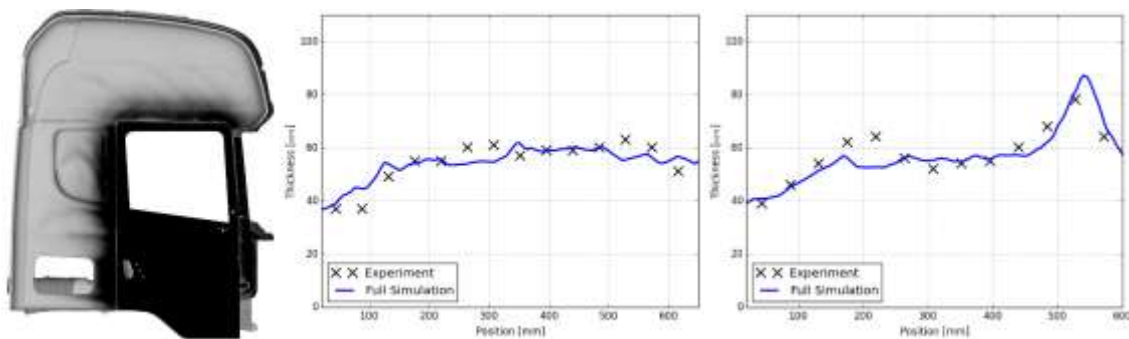




Figur 2. Simulering av målning av en Volvo V60 framskärm (vänster). Jämförelse mellan mätningar och simuleringsresultat på ett antal positioner på framskärmen (höger).

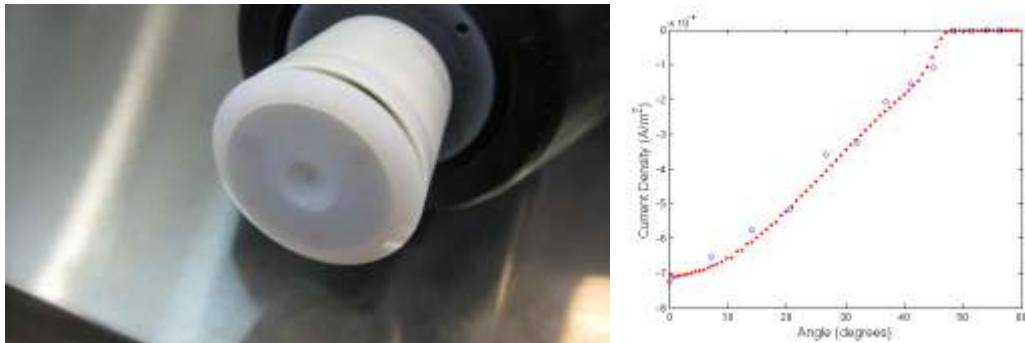


Figur 3. GEMA tvillingpistolapplikatorn (vänster). Jämförelse mellan simuleringsresultat med projektionsmetod och mätningar på en platta (mitten) samt jämförelse av simuleringsresultat vid användning av full simulering och mätningar på en platta (höger).



Figur 4. Validering av färgtjockleken hos en lastbilsdörr som målats med en Dürr Ecobell 2 pulverapplikator.

En stor utmaning i projektet har varit simulering av coronaurladdningen nära applikatoren och uppladdningen av färgpartiklarna när de passerar genom Corona-området. Den komplexa fysiken ställer mycket höga krav på de numeriska metoderna. De nya metoder som utvecklats i detta projekt är mycket robustare än de ad-hoc metoder som finns i litteraturen och är även relevanta för andra applikationer såsom elektrostatisk luftrening.

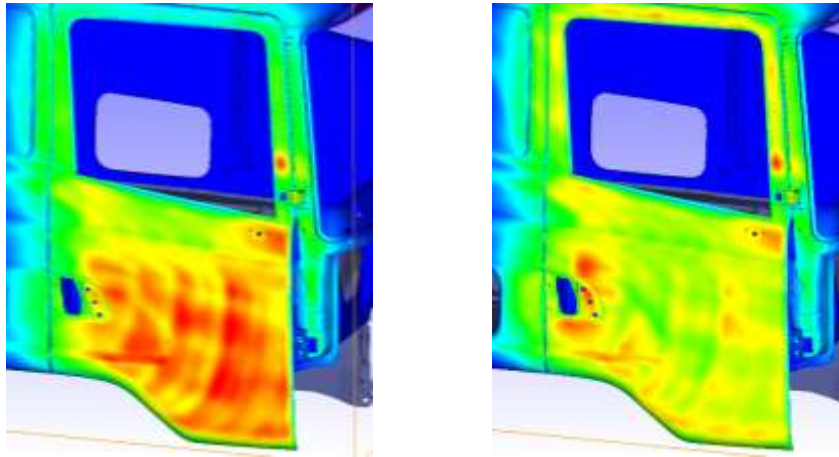


Figur 5. Ecobell 2 applikatoren med den lilla elektrodnålen synlig i mitten (vänster). En jämförelse mellan den simulerade och den uppmätta strömdensiteten på en platta placerad under applikatoren (höger).



Figur 6. ABB G1 applikatoren med sex elektroder (vänster). Jonladdningsdensiteten mellan applikator och mål (mitten). En jämförelse mellan den simulerade och uppmätta strömdensiteten på en platta under applikatoren (höger).

Vidare så har nya metoder och tekniker för att anpassa robothastigheten längs målningen utvecklats för att optimera den slutliga färgtäckningen. Resultaten visar en minskning av variationer i tjocklek med en faktor 2-3, vilket i sin tur betyder en betydande minskning av färgförbrukning. I framtida projekt kommer resultaten generaliseras, såvida att även andra processparametrar kommer att kunna ändras längs robotbanan och även banan i sig.



Figur 7. Resultat för färgtjocklek på en Scania lastbilshytt efter användning av originalinställningar (vänster) och med optimerade hastighetsinställningar (höger). Den genomsnittliga tjockleken var 70  $\mu\text{m}$  i båda fallen, men standardavvikelsen för variationer i tjocklek minskade från 20  $\mu\text{m}$  till 8  $\mu\text{m}$  efter en hastighetsoptimering.

Projektresultaten är klara för industriell implementering och har kommersialiserats i mjukvaran IPS Virtual Paint, vilken används av Volvo Cars, AB Volvo, Scania, CEVT, Daimler och GM. Det nystartade företaget IPS IBOFlow AB kommer ha hand om marknadsföring, försäljning och support. Volvo Personvagnar använder mjukvaran i produktion och till exempel så användes den framgångsrikt för att programmera målerirobotrarna till den nya XC90 modellen. Arbetet har resulterat i fyra tidskriftsartiklar, två konferensbidrag, två artiklar i facktidskrifter rörande ytbehandling, två examensarbeten och en doktorsavhandling.

### 5.1. Leverans mot FFI-mål

- I projektet har metoder, algoritmer och mjukvara utvecklats vilka bidrar till hållbar produktion genom att signifikant öka produktiviteten i beredningsprocessen eftersom färre prototyper behöver målas. Cykeltiden kan minskas genom att optimera robotbanor och lastbalansera robotarnas arbete. Miljöpåverkan kan reduceras genom att välja robotbanor och processparametrar som minimerar färgspill.
- Genom att kunna utföra mer av produktionsberedningen off-line så kan nya produkter introduceras med kortare ledtider.
- Genom att erbjuda en effektiv och lättanvänd mjukvara för simulering av ytbehandlingen så kan fler företag ta steget från manuell till automatiserad sputmålning med stora vinster i effektivitet, produktkvalitet och arbetsmiljö.
- Projektet har ytterligare stärkt den världsledande forskarargrupperingen inom ytbehandlingsprocesser som bidrar till en konkurrenskraftig fordonsindustri i Sverige.

- Det matematikbaserade tillvägagångssättet i projektet är en nyckel för att möta framtidens utmaningar i form av ett ökat antal produkter och materialvarianter.
- Ökar användningen och förståelsen för avancerad matematik i produkt och produktionsutvecklingen.
- Projektet har bidragit till vidareutveckling av Paint Center, i fråga om kompetens och utrustning. Testcentret möjliggör att utvärdera lackeringsprocesser, utan att förlora tillgängligheten i den egna produktionen.
- Ökar samarbetet mellan industri och forskningsinstitut.
- Projektet resulterade i en doktorsavhandling vid Chalmers inom fluiddynamik.
- Projektet har ytterligare förstärkt Sveriges konkurrenskraft som avancerad användare och utvecklare av digitala verktyg i gränslandet mellan produkt och produktion.
- Forskargruppen inom Geometry and Motions Planning hos FCC som är en del av miljön för innovation och samarbete; Wingquist excellence centre vid Chalmers för effektiv produktrealisering, har ytterligare stärkts och vuxit till 20 forskare.
- Forskargruppen inom Computational Engineering and Design hos FCC har ytterligare förstärkts och vuxit från 11 (2012) till 15 forskare. Gruppen arbetar bland annat i flera projekt tillsammans med svensk pappers och förpackningsindustri. Metoder och verktyg som utvecklats inom FFI programmet har kommit till stor nytta i dessa projekt.
- Mjukvaruplattformen IPS för matematikbaserad virtuell produktutveckling har vidareutvecklats och kommer fortsätta att säkra en omfattande och snabb implementering av forskningsresultat, liksom att förenkla teknologiutbyte mellan industriparterna.
- Ett spin-off företag har bildats, IPS IBOFlow AB, som fokuserar på kommersiell produktutveckling, support, marknadsföring och försäljning av mjukvaran IPS Virtual Paint. Några internationella kunder är CEVT, General Motors och Daimler.

## **6. Spridning och publicering**

### **6.1. Kunskaps- och resultatspridning**

Detta projekt har resulterat i ett ökat intresse för att simulera måleri- och ytbehandlingsprocesserna för att kunna reducera tidsåtgången för introduktion av nya produkter, reducera cykeltiden, reducera miljöpåverkan och förbättra kvaliteten. Volvo Cars har använt mjukvaruverktyget i flera år i produktion för att programmera sina målerirobotar. Den nya XC90 modellen är ett exempel där produktberedningen dragit nytta av resultaten från detta och tidigare virtuella måleriprojekt. Scania har valt IPS som en nyckelplattform för simulering av måleri- och ytbehandlingsprocesser, baserat på de lyckade projektresultaten. AB Volvo har ett pågående projekt med FCC där ett prototypsystem för manuell sprutmålning utvecklas delvis baserat på projektresultaten. Ett valideringsprojekt avseende sprutmålning av en hytt utfördes med lyckat resultat under 2014. General Motors som var involverat i tidigare projekt har nyligen köpt en kommersiell licens av

mjukvaran för sprutmålning. Resultaten har även väckt stort internationellt intresse och har vid flertalet tillfällen presenterats vid internationella fordonsmässor. Det finns t.ex. ett pågående samarbete med Daimler avseende sprutmålning och ett utvärderingsprojekt planeras med Volkswagen och Audi.

Projektresultaten och plattformen har upprepade gånger presenterats under företagsbesök, seminarier och utbildningar, inklusive t.ex.:

- ”Den virtuella målerifabriken”, Ytforum, 2:21-22, March 2013
- Inbjudet föredrag vid European Automotive Coating, Pottsdam, maj 2013
- Monter och presentation på Scandinavian coating fair, maj 2013 och maj 2015
- Möte hos Mercedes Benz, Stuttgart, december 2013
- Presentation vid Commercial Vehicle Cluster, Kaiserslautern, mars 2014
- Inbjudet föredrag hos Fraunhofer IPA, Stuttgart, mars 2014
- Presentation vid SurCar 2014 konferens, Shanghai, april 2014
- Utbildning för AB Volvo, juni 2014
- Inbjudet föredrag vid Uppsala Universitet, oktober 2014
- IPS Paint utbildning för projektpartners, november 2014
- IPS Paint utbildning för Scania, november 2014
- Presentation hos Audi, Ingolstadt, november 2014
- Inbjudet föredrag vid European Automotive Coating workshop, Stuttgart, juni 2015

## **6.2. Publikationer**

1. A. Mark, B. Andersson, S. Tafuri, K. Engström, H. Söröd, F. Edelvik, J. S. Carlson, “Simulation of Electrostatic Rotary Bell Spray Painting in Automotive Paint Shops”, *Atomization and Sprays*, 23(1):25-45, 2013.
2. “Den virtuella målerifabriken“, Ytforum, 2:21-22, March 2013.
3. Niklas Karlsson „An Incompressible Navier-Stokes Equations Solver on the GPU Using CUDA“, MSc thesis, Chalmers University of Technology, advisor A. Mark, August 2013.
4. B. Andersson, V. Golovitchev, S. Jakobsson, A. Mark, F. Edelvik, L. Davidson, J. S. Carlson, “A Modified TAB Model for Simulation of Atomization in Rotary Bell Spray Painting”, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 3(2):54-61, 2013.
5. B. Andersson, “Modeling and Simulation of Rotary Bell Spray Automizers in Automotive Paint Shops“, PhD thesis, Chalmers, December 2013.
6. A. Mark, R. Bohlin, D. Segerdahl, F. Edelvik, J. S. Carlson, “Optimization of Robotized Sealing Stations in Paint Shops by Process Simulation and Automatic Path Planning”, *International Journal of Manufacturing Research*, 9(1), 2014.

7. F. Edelvik, A. Mark, C. Zémerli, O. Hermanns, “Efficient numerical simulation of spray painting processes”, In proceeding from Third Commercial Vehicle Technology Symposium, Kaiserslautern, Germany, pp. 499-508, March 2014.
8. C. Zémerli, K. Dressler, O. Hermanns, F. Edelvik, A. Mark, “Efficient numerical simulation of spray painting processes in automotive manufacturing”, AE Technical Paper Series, 2014-36-0418, Sao Paolo, Brazil, October 2014.
9. T. Johnson, S. Jakobsson, B. Wettervik, B. Andersson, A. Mark, F. Edelvik, “A Finite Volume Method for Electrostatic Three Species Negative Corona Discharge Simulations with Application to Externally Charged Powder Bells”, Journal of Electrostatics, 74:27-36, April 2015.
10. B. Svedung Wettervik, ”Three-species negative corona discharge simulations using domain decomposition”, MSc thesis, Chalmers University of Technology, advisor T. Johnson, May 2015.
11. ”Tillämpad matematik ger effektivare lackeringsprocesser”, Ytforum, 3:19-20, 2015.
12. F. Edelvik, A. Mark, N. Karlsson, J. S. Carlson, Math-Based Algorithms and Software for Virtual Product Realization Implemented in Automotive Paint Shops, Book chapter, Mathematics for Digital Factories, Springer, submitted.

## **7. Slutsatser och framtida forskning**

Projektresultaten visar att det är möjligt att noggrant simulera sprutmålning av t.ex. en lastbilshytt på endast några timmar på en standarddator. Detta är en extrem förbättring jämfört med tidigare tillvägagångssätt som kräver veckolånga simuleringar. Unika algoritmer för kopplade simuleringar av luftflöde, elektromagnetiska fält och laddade färgpartiklar har möjliggjort detta. Metoderna och verktygen har genomgått en omfattande validering på relevanta industrifall med mycket god överensstämmelse mellan mätningar och simuleringsresultat. Paint centret bidrog med input och valideringsdata utan att påverka någon egen produktion hos de industriella parterna. De snabba simuleringarna gör det möjligt att använda detaljerade simuleringar i produktionsberedningen och off-line programmeringen av målningsrobotorna. Resultaten i detta projekt underlättar en större användning av mjukvaran inom fordonsindustrin samt spridning till andra branscher och även mindre företag.

En stor utmaning i projektet har varit simulering av coronaur-laddningen nära applikatoren och uppladdningen av färgpartiklarna när de passerar genom Corona-området. Den komplexa fysiken ställer mycket höga krav på de numeriska metoderna. De nya metoderna som utvecklats i detta projekt är mycket robustare än de ad-hoc metoder som finns i litteraturen och är även relevanta för andra applikationer såsom elektrostatisk luftrening.

Vidare så har nya metoder och tekniker för att anpassa robothastigheten längs målningen utvecklats för att optimera den slutliga färgtäckningen. Resultaten visar en minskning av variationer i tjocklek med en faktor 2-3, vilket i sin tur innebär en betydande minskning

av färgförbrukning. För gaffeltrucken är en 20% minskning av färgmängden med bibehållen minimitjocklek inom räckhåll. I framtida projekt kommer resultaten generaliseras, såvida att även andra processparametrar kommer att kunna ändras längs robotbanan och även banan i sig.

Projektresultaten är klara för industriell implementering och har kommersialiserats i mjukvaran IPS Virtual Paint, vilken används av Volvo Cars, AB Volvo, Scania, CEVT, Daimler och GM. Det nystartade företaget IPS IBOFlow AB har hand om marknadsföring, försäljning och support. Volvo Cars använder mjukvaran i produktion och till exempel så användes den framgångsrikt för att programmera målerirobotrarna till den nya XC90 modellen.

Den långsiktiga visionen med forskningen av den virtuella målerifabriken är att radikalt rationalisera ytbehandlingen i svensk industri, genom att utveckla simuleringsverktyg som gör det möjligt att helt automatisera produktberedningsprocessen i målerifabriken. Med en geometrisk beskrivning och tillgängliga penslar som input, skall optimala robotbanor och processförhållanden som garanterar en specifik täckning samt visuella resultat såsom glans och färgmatchning räknas ut per automatik. Detta är naturligtvis ett extremt komplext problem, men forskningsgruppen har en unik plattform till hands för denna utmaning. Om det lyckas, skulle det dramatiskt förbättra produktiviteten och minska miljöpåverkan under produktberedning såväl som i produktion. Denna vision kommer att förverkligas i flera steg och projektgruppen kommer under slutet av 2015 att ansöka om ett nytt FFI projekt inriktat mot närklockesimulering, och där skapa en databas med de vanligaste applikatorerna som används i industrin. Projektet har en hög TRL-nivå, men det är nödvändigt för att realisera en bredare användning av mjukvaran inom fordonstillverkarna och dess underleverantörer. Vidare så underlättar det för en mer spridd användning utanför fordonsindustrin inklusive hos mindre företag.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Detta har varit ett samarbetsprojekt mellan de industriella partnerna Scania CV, Volvo Personvagnar, AB Volvo, BT Products AB, Allt I Plåt AB och Falk Lack AB, samt forskningspartnerna Fraunhofer-Chalmers Research Center (FCC) och Swerea IVF. En styrgrupp med en representant från varje partner har utsetts skött projektledning. Gruppen har varit ansvarig för projektkontroll, finanser och rapportering till VINNOVA. Den dagliga verksamheten har hanterats av Christer Bodén, Scania (Industriell projektledare) och Fredrik Edelvik, FCC (Akademisk projektledare).

Namn	Roll	Organisation	E-mail och telefon
Christer Bodén	Projektledare, Industriell partner	Scania CV	<a href="mailto:christer.boden@scania.com">christer.boden@scania.com</a> +46-8-55381646
Henrik Söröd	Industriell partner	Scania CV	<a href="mailto:henrik.sorod@scania.com">henrik.sorod@scania.com</a>



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Jörg Wohner	Industriell partner	Volvo Cars	<a href="mailto:jorg.wohner@volvocars.com">jorg.wohner@volvocars.com</a> +46-31-3257760
Henrik Kloo	Industriell partner	AB Volvo	<a href="mailto:henrik.kloo@volvo.com">henrik.kloo@volvo.com</a> +46-31-3227099
Hoa Hai-Gieng	Industriell partner	BT Products AB	<a href="mailto:hoahai.gieng@toyotaindustries.eu">hoahai.gieng@toyotaindustries.eu</a>
Cecilia Groth	Forskningspartner	Swerea IVF	<a href="mailto:cecilia.groth@swerea.se">cecilia.groth@swerea.se</a> +46-31-7066040
Fredrik Edelvik	Forskningsledare	Fraunhofer-Chalmers Centre	<a href="mailto:fredrik.edelvik@fcc.chalmers.se">fredrik.edelvik@fcc.chalmers.se</a> +46-31-7724246



SCANIA

VOLVO



swerea|IVF



FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Adress: FFI/VINNOVA, 101 58 STOCKHOLM  
Besöksadress: VINNOVA, Mäster Samuelsgatan 56, 101 58 STOCKHOLM  
Telefon: 08 - 473 30 00